

В. Н. Хмелев, Д. С. Абраменко, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне

Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск, 659305, Трофимова, 27, e-mail: vnh@bti.secna.ru

Контроль параметров ультразвуковых технологических аппаратов

Получена 03.09.2010, опубликована 21.09.2010

Статья посвящена поиску решения проблемы контроля амплитуды ультразвуковых колебаний, вводимых в технологические среды в процессе эксплуатации ультразвуковых аппаратов. Показывается, что совершенствование способа измерения путем визуального наблюдения колеблющейся поверхности через микроскоп с использованием двух стробоскопических источников света не позволяет обеспечить непрерывный контроля в процессе эксплуатации аппаратов. На основании анализа процесса преобразования и введения ультразвуковых колебаний показывается возможность измерения амплитуды колебаний по величине тока, протекающего в «механической ветви» ультразвуковой колебательной системы. Представлены результаты экспериментальных исследований предложенного способа.

Ключевые слова: ультразвук, измерение, амплитуда

ВВЕДЕНИЕ

Максимальная эффективность различных технологических процессов, реализуемых под действием ультразвуковых колебаний, может быть достигнута только при обеспечении оптимальных параметров ультразвукового воздействия.

Одним из основных параметров, характеризующих эффективность ультразвукового воздействия, является амплитуда механических колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы [1]. Из-за экстремального характера кавитационного воздействия в жидких средах, необходимо не только устанавливать определенное значение амплитуды колебаний для инициирования различных процессов, но и поддерживать оптимальное значение амплитуды при возможных изменениях параметров сред (плотность, концентрация, вязкость) и для исключения влияния дестабилизирующих факторов (изменения температуры сред и материалов колебательной системы, демпфирующего действия среды на колебательную систему и т.п.).

В связи с тем, что оптимальное ультразвуковое воздействие обеспечивает максимальную производительность процесса или получение конечного продукта наилучшего качества, возникает необходимость в непрерывном контроле параметров ультразвукового воздействия (амплитуды колебаний). При этом, контроль необходимо

осуществлять в течение всего жизненного цикла ультразвукового (УЗ) аппарата, начиная с его первоначальной настройки, реализации технологических процессов, диагностики и ремонта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Хотя современная виброметрия располагает большим количеством различных методов (механические — контактные, индукционные, оптические и другие), практически все они разработаны для проведения измерений на низких частотах (десятки-сотни герц), и могут применяться с большими ограничениями для измерения амплитуды колебаний УЗ частоты. Из-за особенностей практической реализации УЗ технологий (необходимости проведения измерений в жидкостях, в том числе и агрессивных, кавитационного разрушения вносимых датчиков) все методы традиционной виброметрии непригодны для решения задачи непрерывного контроля амплитуды колебаний в процессе реализации процессов химических технологий.

Таким образом, задачу создания системы контроля выходных параметров УЗ аппаратов нужно разделить на две — это создание универсального и точного метода, не требующего калибровки под конкретную измерительную систему или ситуацию, и создание универсального метода косвенного измерения и контроля, пригодного для применения непосредственно в процессе реализации любого технологического процесса.

2. СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПРИ ВОЗМОЖНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Для решения первой задачи был модернизирован известный способ непосредственного измерения амплитуды путем визуального наблюдения колебаний излучающей поверхности через микроскоп. Для повышения точности и производительности процесса измерения были использованы два источника стробоскопического освещения с отличными друг от друга длинами волн излучения, а моменты излучения каждого из них были синхронизированы с максимальными колебательными смещениями излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). Длины волн излучения были выбраны такими, чтобы они визуально воспринимались как излучение красного, синего или зеленого цвета. Таким образом, при наблюдении через окуляр микроскопа создается светотеневое изображение, состоящее из трех зон. Ширина средней зоны соответствует размаху (удвоенной амплитуде) механических колебаний [2]. Схема, поясняющая принцип формирования светотеневого изображения представлена на рис. 1.

Основными преимуществами предложенного стробоскопического способа [2] являются: возможность получения абсолютной величины амплитуды механических колебаний и отсутствие необходимости калибровки средства измерения под конкретный тип, конструкцию и материал колебательной системы, а также форму излучающей поверхности. Таким образом, способ может быть использован как эталонный для других способов измерения.

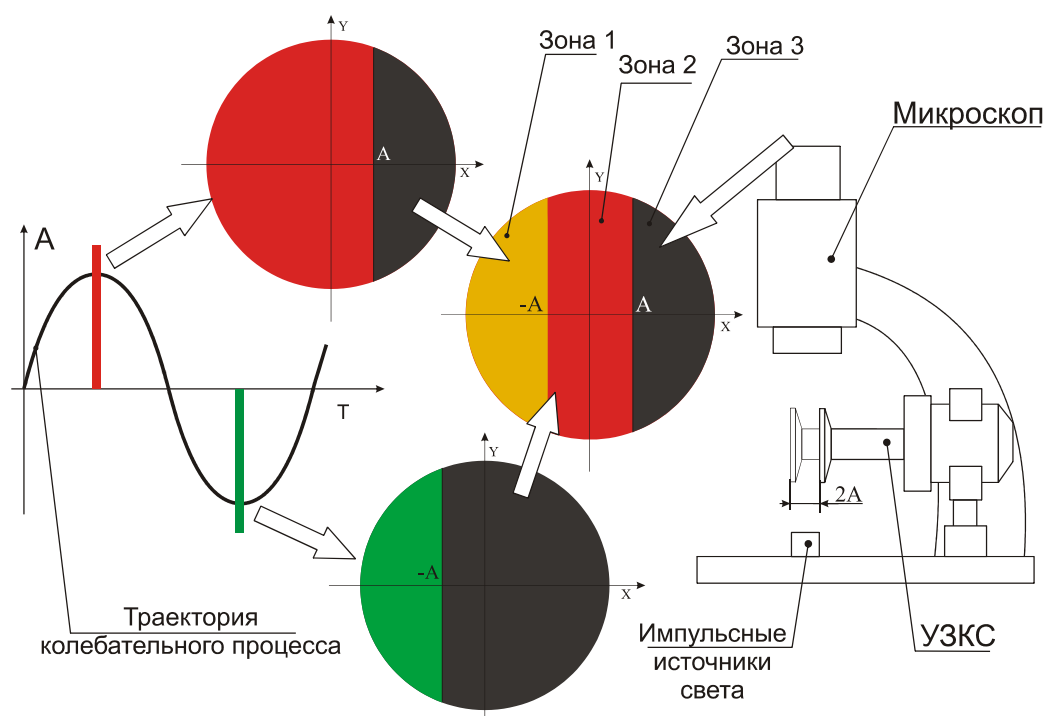


Рис. 1. Схема формирования светотеневого изображения

Исследование функциональных возможностей стробоскопического способа измерения позволило установить возможность измерения распределения амплитуды колебаний вдоль всей кромки видимого в окуляр микроскопа участка излучающей поверхности рабочего окончания [3]. Причем, одновременно удалось наблюдать все колебания, совершаемые в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа. На рис. 2 представлено светотеневое изображение, видимое в окуляре микроскопа, при измерении амплитуды рабочего инструмента в виде шила со слегка изогнутым окончанием.

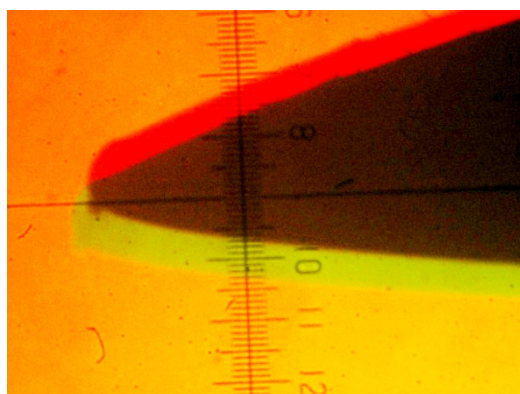


Рис. 2.

Распределение амплитуды колебаний
вдоль рабочей поверхности УЗКС

Колебания, совершаемые с противоположными фазами, легко различаются, т.к. имеют различные цвета (или яркости) свечения. На рис. 3 представлен пример светотеневого изображения, на котором видны колебания с противоположными фазами и точка минимума.

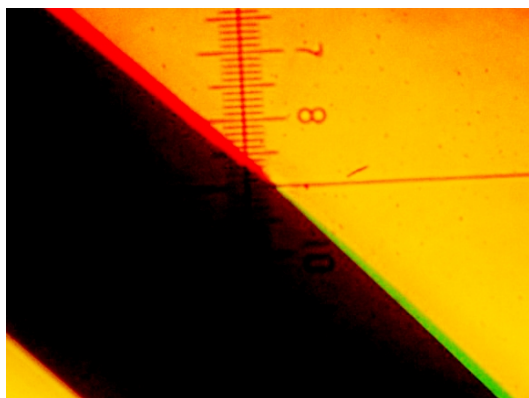


Рис. 3.

Распределение амплитуды колебаний
вдоль рабочей поверхности УЗКС

К сожалению, визуальное наблюдение оператором снижает точность контроля и не позволяет автоматизировать процесс измерения. Для автоматизации процесса измерения было использовано два способа регистрации результатов измерения.

Первый заключается в использовании цифрового фотографического аппарата для регистрации светотеневого изображения и последующей обработки стандартными методами цифровой обработки сигналов. Такой способ, хотя и позволяет достаточно легко вести протоколирование результатов измерения, контролировать фазу и распределение колебаний вдоль поверхности, однако имеет ограничение по быстродействию и требует для цифровой обработки ПК.

Второй способ регистрации заключается в следующем. Перекрываемый колеблющимся телом световой поток пропускают через ограничительную диафрагму с отверстием прямоугольной формы, которую располагают таким образом, чтобы направление колебаний тела совпадало с одной из граней ее отверстия. Не перекрытую часть светового потока разделяют на два равных световых потока, при этом один из них проходит через светофильтр, пропускающий только излучение, имеющее длину волны излучения первого импульсного источника излучения, а второй проходит через другой светофильтр, пропускающий только излучение, имеющее длину волны излучения второго импульсного источника излучения. Каждый световой поток падает на отдельный преобразователь освещенность-напряжение, причем указанные преобразователи имеют равную чувствительность, но первый — к излучению с длиной волны излучения первого импульсного источника излучения, а второй — к излучению с длиной волны излучения второго импульсного источника излучения. Амплитуду колебаний при этом определяют по разности напряжений регистрируемых электрических сигналов.

Сущность предложенного способа регистрации поясняет рис. 4, на котором схематично представлены процессы преобразования световых потоков, испускаемых первым (а) и вторым (б) импульсными источниками излучения, происходящие при измерении амплитуды и обработке результатов. Разработанный способ регистрации позволил значительно снизить время одного измерения.

Опытная реализация нового способа измерения, независимо от способа регистрации, показала его высокую точность и эффективность при первоначальной настройке, диагностике и ремонте УЗ аппаратов различного типа и назначения.

Основным недостатком созданного способа контроля является невозможность его применения для контроля в жидких средах, размерной обработке, т.е. в тех случаях, когда нет возможности осуществлять визуальное наблюдение колеблющейся поверхности.

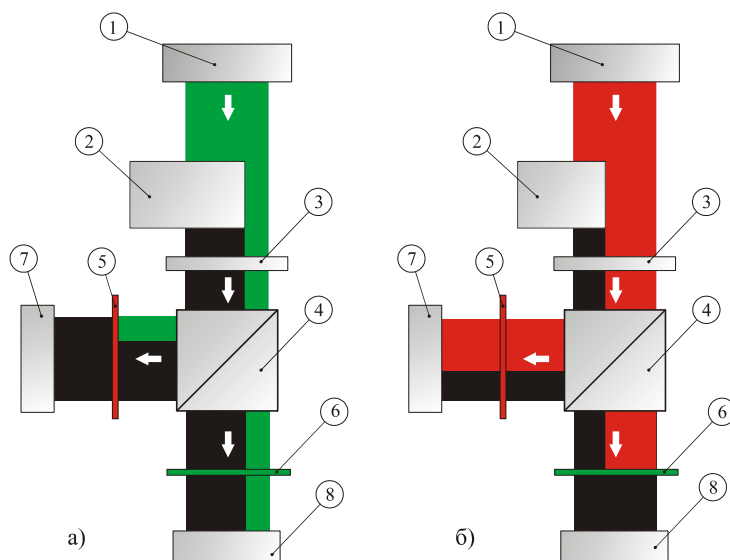


Рис. 4. Преобразование световых потоков во втором способе регистрации
 1 — импульсные источники излучения, 2 — колеблющееся тело, 3 — ограничивающая диафрагма с отверстием прямоугольной формы, 4 — призма, 5, 6 — светофильтры, 7, 8 — преобразователи «освещенность-напряжение»

3. СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПРИ НЕВОЗМОЖНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для решения проблемы контроля амплитуды при невозможности визуального наблюдения колеблющейся поверхности необходимо создать новый способ непрерывного контроля амплитуды колебаний непосредственно в процессе эксплуатации УЗ технологических аппаратов. Очевидно, что в этом случае, способ должен быть основан на косвенных измерениях электрических параметров самого УЗ аппарата. Поскольку известно, что выходные параметры УЗКС зависят от режима электрического питания, возникает необходимость определить — какая из электрических величин, контролируемых на входе преобразователя: напряжение, сила тока или мощность, способна дать наиболее полную и достоверную информацию о значении амплитуды механических колебаний.

3.1. Теоретическое обоснование

Для выявления контролируемой электрической величины используют универсальный метод У. Мэсона и метод электромеханических аналогий [4]. Такой подход позволяет создать, представленную на рис. 5 эквивалентную схему замещения пьезоэлектрической УЗКС.

В схеме замещения индуктивность L_M эквивалентна колеблющейся массе преобразователя, емкость C_M — гибкости, активное сопротивление R_M — сопротивлению механических потерь, R_H — сопротивлению излучения, C_K — электрической емкости пьезокерамических элементов, R_d — диэлектрическим потерям.

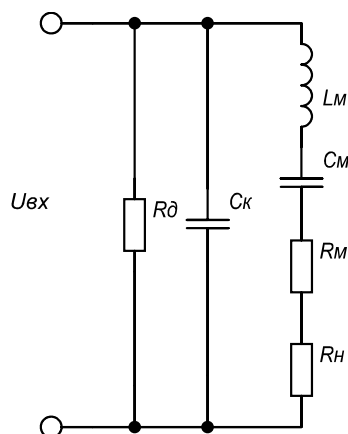


Рис. 5.

Схема замещения пьезоэлектрической колебательной системы

Сопротивление механических потерь R_M обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях. Кроме того, в местах закрепления преобразователя также имеются потери механической энергии. Силы трения пропорциональны колебательным скоростям, коэффициент пропорциональности между ними и есть активное механическое сопротивление, в котором выделяется мощность потерь.

Сопротивление излучения R_H определяется параметрами излучателя и пропорционально волновому сопротивлению окружающей среды. Электрическая емкость C_K обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью материала преобразователя.

Элементы L_M , C_M , R_H , R_M образуют так называемую «механическую ветвь» эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы.

При резонансе последовательного механического контура ($L_M C_M$ на рис. 5) полное сопротивление контура равно нулю и схему замещения удобно представить в виде, показанном на рис. 6. Реактивность нагрузки на резонансной частоте определяется емкостью C_K .

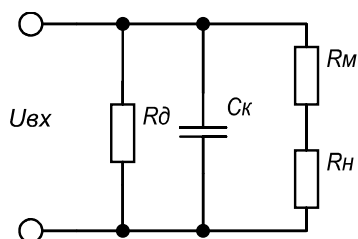


Рис. 6.

Схема замещения пьезоэлектрического преобразователя на резонансной частоте

Вдали от частот резонанса ток в цепи возбуждающих электродов мал и определяется в основном межэлектродной емкостью. По мере приближения частоты возбуждающего напряжения к частоте механического резонанса УЗКС — амплитуда механических колебаний растет, достигая максимума на этой частоте. Пропорционально возрастает и заряд на электродах. Полярность зарядов изменяется с частотой входного сигнала, в результате через пьезоэлектрический элемент протекает переменный ток, пропорциональный амплитуде механических колебаний.

Анализ эквивалентной схемы пьезоэлектрической системы позволил установить, что значение амплитуды механических колебаний УЗКС, в интервале линейности свойств системы, прямо пропорционально значению тока механической ветви (т.е. разнице между полным током колебательной системы и его емкостной составляющей, обусловленной собственной электрической емкостью пьезоэлектрических элементов системы), т.е. определяется как:

$$A = M \cdot I_m,$$

где A — амплитуда механических колебаний излучающей поверхности УЗКС, I_m — ток механической ветви УЗКС, M — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, для стабилизации амплитуды колебаний недостаточно стабилизировать величину тока I или напряжения U питания УЗКС, а необходимо стабилизировать значение тока механической ветви I_m УЗКС.

К сожалению, такой способ стабилизации амплитуды колебаний не получил практического распространения из-за отсутствия информации о значении и зависимости величины коэффициента пропорциональности от параметров используемых пьезоэлектрических колебательных систем.

3.2. Экспериментальные исследования

Для практического применения способа, подтверждения возможности контроля абсолютной величины амплитуды колебаний излучающей поверхности по электрическим параметрам УЗКС, создания специализированных устройств для практической реализации метода, установления точности таких измерений и определения границ их применимости в реальных условиях работы УЗ аппарата необходимо детальное исследование процесса контроля амплитуды по электрическим параметрам УЗКС.

Для выявления характера зависимостей были проведены экспериментальные исследования по практическому определению коэффициента пропорциональности. Для измерения амплитуды механических колебаний был использован наиболее простой, точный и универсальный стробоскопический способ непосредственного измерения абсолютной величины амплитуд [2, 3]. Для исследования был взят серийный терапевтический ультразвуковой аппарат «Тонзиллор-ММ» [5], поскольку в стандартную комплектацию включен набор сменных рабочих инструментов, каждый из которых имеет различную форму и длину. Внешний вид рабочих инструментов представлен на рис. 7. Стандартный набор включает рабочие инструменты двух длин:

полуволновые (рис. 7, рабочие инструменты №5–7) и двухполуволновые (рис. 7, рабочие инструменты №1, 2). Инструменты не только отличаются по длине (полуволновые и волновые), но и имеют различные диаметры торцевой присоединительной поверхности, поскольку одна группа полуволновых рабочих инструментов специально была выполнена из заготовок меньшего диаметра. Для получения информации о характере зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока, протекающего в механической ветви УЗКС, набор инструментов был дополнен рабочими инструментами №3, 4. Основным отличием этих рабочих инструментов является, то, что диаметр присоединительного торца рабочего инструмента №4 соответствует группе двухполуволновых, хотя и имеет полуволновую длину. Для рабочего инструмента №3 справедливо противоположное утверждение (двухполуволновой инструмент с соединительным торцом меньшего диаметра). Оба эти рабочих инструмента были согласованы по частоте с электроакустическим преобразователем УЗКС.



Рис. 7.

Внешний вид сменных рабочих инструментов

Стандартная схема системы управления электронного генератора была дополнена измерительной схемой, реализующий разностный способ измерения тока, протекающего в механической ветви УЗКС. Измерения проводились при отсутствии влияния акустической нагрузки на рабочий инструмент (измерения производились в воздухе).

Были проведены синхронные измерения амплитуды механических колебаний посредством стробоскопического способа и измерением амплитуды тока механической ветви, при закреплении на УЗКС различных сменных рабочих инструментов.

Полученные графики зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока механической ветви представлены на рис. 8.

Анализ зависимостей свидетельствует о том, что:

- амплитуда механических колебаний при увеличении тока, протекающего в механической ветви УЗКС, изменяется линейно для всех рабочих инструментов, причем линейность не нарушается во всем рабочем диапазоне амплитуд (от 25 до 90...150 мкм для разных типов рабочих инструментов) как для стандартного набора рабочих инструментов, так и для дополнительных;

- графики зависимости амплитуды колебаний от тока отличаются только углом наклона, причем угол наклона зависит от длины рабочего инструмента, а при равных длинах — от площади излучающей поверхности.

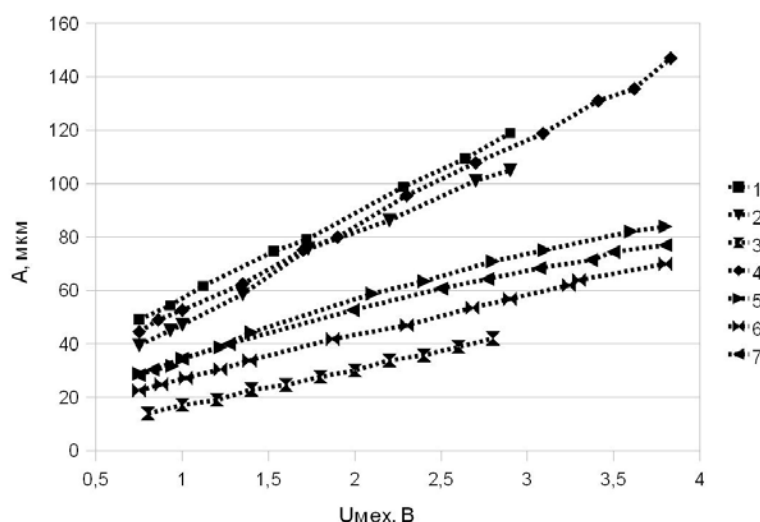


Рис. 8. График зависимости амплитуды механических колебаний от величины напряжения, пропорциональной току механической ветви, для различных рабочих инструментов

Таким образом, в результате исследований показано, что при отсутствии акустической нагрузки, действующей на излучающую поверхность, зависимость амплитуды механических колебаний от тока механической ветви УЗКС является линейной. Аналогичные результаты получены при использовании различных технологических инструментов.

Поскольку рассмотренный случай излучения в газовые среды является идеализированным и в реальной практике применения УЗ колебаний практически не встречается, возникает необходимость в проведении дополнительных исследований влияния акустической нагрузки на линейность выявленных зависимостей.

3.2.1. Исследование влияния величины акустической нагрузки

Дальнейшие исследования заключались в измерении амплитуды механических колебаний при стабилизации величины тока механической ветви и постепенном увеличении акустической нагрузки.

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 9.

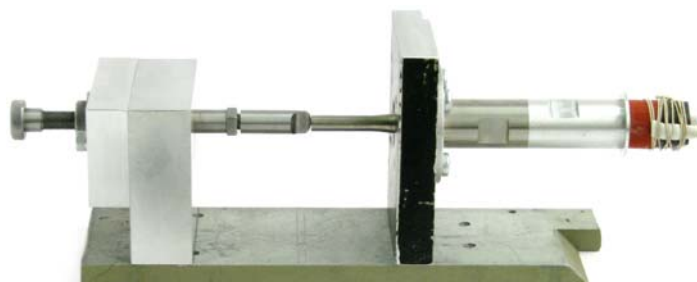


Рис. 9. Внешний вид установки позволяющей изменять усилие прижима к излучающей поверхности

При проведении исследований, колебательная система жестко фиксировалась. Стробоскопический измеритель настраивался на измерение в точке рабочего окончания, совпадающей с геометрическим центром рабочего окончания. За начальное состояние принималось такое значение питающего напряжения, при котором величина амплитуды механических колебаний составляла 60 мкм. Затем к области рабочего окончания близкой к точке измерения амплитуды прижимался резиновый элемент. Конечным усилием прижима принималось усилие, при котором величина питающего напряжения увеличивалась на 50% по отношению к исходному состоянию (работа без акустической нагрузки). Внутри указанного интервала проводилось четыре измерения. Результаты измерений показали, что в пределах указанных акустических нагрузок, стабилизация величины тока механической ветви обеспечивает стабилизацию амплитуд механических колебаний с точностью не менее 7%. Полученные результаты были подтверждены при проведении исследований с применением других ультразвуковых аппаратов.

Серия светотеневых изображений колебательного процесса представлена на рис. 10.

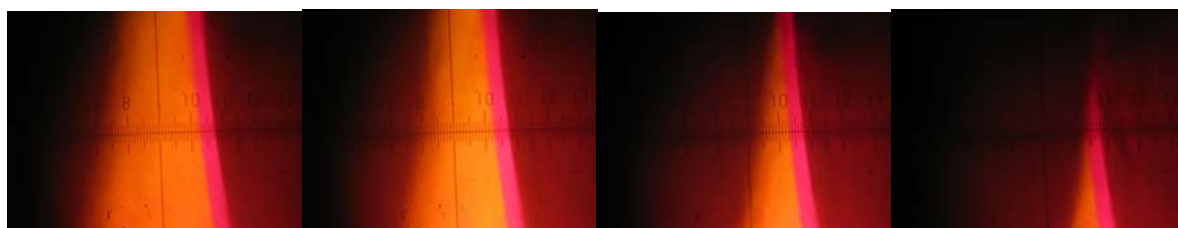


Рис. 10. Серия светотеневых изображений колебательного процесса, иллюстрирующих неизменность амплитуды механических колебаний при изменении усилия прижима

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что значение акустической нагрузки (изменения плотности, вязкости и т.п.) не влияет на точность полученных зависимостей.

3.2.2. *Результаты экспериментальных исследований*

Результаты исследований позволили сделать вывод об отсутствии, или точнее, незначительном влиянии акустической нагрузки на линейность исследуемой зависимости.

Как было показано, величина угла наклона исследуемой зависимости определяется длиной рабочего инструмента только для стандартного набора рабочих инструментов. Площадь излучающей поверхности, хотя и оказывает влияние на угол наклона, но сложна в вычислении и не всегда очевидна из-за того, что некоторые рабочие инструменты имеют рабочее окончание сложной формы. В связи с этим возникла необходимость провести дополнительные исследования для выявления параметра УЗКС, наиболее полно характеризующего значение коэффициента пропорциональности M .

Теоретическое определение коэффициента пропорциональности M затруднено, поскольку он характеризует одновременно преобразование электрической энергии в согласующем колебательном контуре электронного генератора, преобразование электрической энергии в упругие механические колебания пьезоэлектрических элементов и усиление этих колебаний при распространении вдоль всей колебательной системы.

В большинстве случаев влияние всех перечисленных параметров преобразования и усиления определяется при проектировании конструкции УЗКС и настройке электронного генератора, и остаётся неизменными в течение всего срока эксплуатации УЗ аппарата. Однако в процессе эксплуатации УЗ аппарата, при использовании одной колебательной системы и ее комплектации различными сменными рабочими инструментами (полуволновой или многополуволновой длины), возможно изменение коэффициента усиления, характеризующего усиление механических колебаний при их распространении вдоль системы. В этом случае значение коэффициента пропорциональности M будет зависеть от коэффициента усиления УЗКС с закрепленным сменным рабочим инструментом и может быть представлено в следующем виде:

$$M = M' \cdot K_{yc},$$

где M' — коэффициент пропорциональности между величиной тока механической ветви и амплитудой механических колебаний, не учитывающий коэффициент усиления УЗКС, K_{yc} — коэффициент усиления УЗКС с закрепленным сменным рабочим инструментом.

В связи с этим возникает необходимость, для контроля величины амплитуды механических колебаний непосредственно в процессе работы УЗ аппарата, произвести калибровку (расчет величины коэффициента M по измеренным значениям A и I_m), т.е. произвести синхронные измерения амплитуды механических колебаний и амплитуды тока механической ветви УЗКС при последовательном увеличении напряжения питания УЗКС. Значение тангенса угла наклона графика зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока механической ветви к оси абсцисс будет соответствовать значению коэффициента M .

Для дальнейшего анализа характера зависимостей была проведена линейная аппроксимация полученных данных, зависимостью вида:

$$A = M \cdot I_m + C,$$

где C — значение амплитуды механических колебаний в точке пересечения с осью ординат.

Отличное от нуля значение C позволяет сделать вывод о том, что при нулевом значении тока механической ветви существует некоторый уровень амплитуды механических колебаний. Это невозможно и, вероятнее всего, объясняется более сложной формой зависимости амплитуды от величины тока при малых значениях. Область амплитуд менее 5...10 мкм редко применяется при реализации технологических процессов и поэтому исключена из дальнейшего рассмотрения.

Численные значения общего коэффициента усиления для УЗКС с различными рабочими инструментами были получены на этапе проектирования и использовались для расчета численного значения коэффициента M' . Все полученные данные сведены в итоговую таблицу 1.

Таблица 1. Результаты линейной аппроксимации результатов измерения

№ рабочего инструмента	C	M	K_{yc}	M'
1	20,81	32,27	28,11	1,148
2	19,82	32,51	28,45	1,143
3	16,99	31,17	28,5	1,094
4	19,46	15,65	14,73	1,062
5	16,57	18,63	16,55	1,126
6	18,49	16,05	15,35	1,046
7	20,07	14,31	13,16	1,087

Из таблицы следует, что значение коэффициента M' для колебательной системы со всеми инструментами является величиной постоянной, отклонение от среднего значения не превышает 5%. Следовательно, если УЗ аппарат содержит в своем составе набор сменных рабочих инструментов, присоединяемых к одному УЗ преобразователю, процесс расчета значения коэффициента M можно значительно ускорить путем расчета значения коэффициента M' только для одного любого рабочего инструмента, и последующего умножения на коэффициент усиления для выбранного рабочего инструмента.

Таким образом, в результате проведенных исследований теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность контроля амплитуды механических колебаний пьезоэлектрической колебательной системы по величине электрического тока, протекающего через механическую ветвь системы. Результаты измерений показали адекватность таких измерений и возможность применения предложенного способа для измерения амплитуды механических колебаний непосредственно в процессе реализации любого технологического процесса.

Для практической реализации предложенного способа контроля амплитуды необходимо выполнить следующие шаги:

- провести синхронные измерения абсолютного значения амплитуды механических колебаний и тока механической ветви УЗКС;
- рассчитать значение коэффициента M и диапазон амплитуд, где его значение остается постоянной величиной;
- занести полученные значения в программу управления УЗ аппарата;
- в процессе работы необходимо непрерывно измерять и стабилизировать значение I_m , рассчитываемого в диапазоне линейности свойств УЗКС, как: $I_m = A / M$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. Для обеспечения контроля в период всего жизненного цикла УЗ аппарата необходимо использовать два подхода, поскольку из-за особенностей УЗ технологии разработка одного универсального способа представляет значительную сложность.
2. Предложен и разработан способ оптического контроля, пригодный для контроля при возможности визуального наблюдения колеблющейся поверхности; способ не требует предварительной калибровки, обеспечивает измерение абсолютной величины амплитуды колебаний и может использоваться в качестве образцового средства измерения для других способов измерения.
3. Предложен и разработан способ контроля амплитуды колебаний по величине тока «механической ветви» УЗКС, обеспечивающий возможность непрерывного измерения в процессе реализации любого технологического процесса.
4. Экспериментальные исследования и опытная эксплуатация устройств, реализующих предложенные способы, показала их высокую эффективность, точность и универсальность.
5. Разработанный способ обеспечил возможность контроля амплитуды колебаний любого из числа сменных рабочих инструментов при первоначальной настройке по одному из них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Б. А. Агранат. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа, 1987, 352 с.
2. Г. В. Леонов, В. Н. Хмелев, Д. С. Абраменко, И. И. Савин. Способ измерения амплитуды колебаний. Патент РФ №2292530.
3. D. S. Abramenko, V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, A. N. Lebedev. Usage features of contact and noncontact measuring methods of oscillation amplitude during adjustment process of ultrasonic devices. Ninth international workshops and tutorials on electron devices and materials EDM'2008. Novosibirsk: NSTU, 2008, p. 223–226.
4. А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982, 276 с.
5. В. Н. Хмелев, Д. С. Абраменко, В. В. Педдер, С. Н. Цыганок, Р. В. Барсуков. Исследование функциональных возможностей пьезоэлектрических преобразователей. Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'09. Novosibirsk: NSTU, 2009, p. 233–241.